

**БОРОВИК П.В.**, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗКИ НА НОЖНИЦАХ С УЧЕТОМ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАНИНЫ**

Рассмотрено влияние учета упругой деформации станины ножниц при моделировании процесса резки на ножницах. Установлено, что стадия вмятия ножей в металл сопровождается упругой деформацией станины ножниц, что оказывает влияние на характер нарастания силы резания. В целом учет упругой деформации станины ножниц в ходе математического моделирования позволяет приблизить результаты теоретических решений к экспериментальным и расширить представление о ходе процесса резки.

Розглянутий вплив урахування пружної деформації станини ножиць при моделюванні процесу різання на ножицях. Встановлено, що стадія вминання ножів в метал супроводжується пружною деформацією станини ножиць, що робить вплив на характер зростання сили різання. В цілому врахування пружної деформації станини ножиць в ході математичного моделювання дозволяє наблизити результати теоретичних рішень до експериментальних і розширити уявлення про хід процесу різання.

The influence at simulating of the cutting process on the scissors with account of elastic deformation of the scissors stand is considered. It is established, that the stage of knives pressing in the metal is accompanied by the elastic deformation of the scissors stand, which has effect on the nature of increasing cutting forces. In general account of elastic deformation of the scissors stand at the mathematical simulation allows bringing the results of theoretical solutions to the experimental and expanding the understanding of the cutting process.

Развитие и совершенствование методов расчета и возможностей современной вычислительной техники способствует повышению значимости математического моделирования процессов обработки давлением. На современном этапе повышение качества производимой продукции при одновременном снижении энергозатрат производимых технологических операций являются одним из основных направлений развития современного металлургического производства. В частности, в технологических линиях производства толстых горячекатаных листов очень эффективным является применение процесса горячей резки. При этом растет актуальность применения теоретических исследований для анализа и оптимизации исследуемого процесса, поскольку экспериментальные исследования процессов обработки давлением в промышленных условиях сопряжены с целым рядом финансовых и организационных трудностей. Кроме того, современные методы расчета способны в максимально полной степени отображать реальные физические процессы, протекающие в металле.

Метод конечных элементов (МКЭ), в настоящее время, все более широко используется при решении разнообразных задач [1], в том числе и при математическом моделировании процессов обработки давлением.

Максимально полная степень отображения реального процесса в ходе моделирования МКЭ возможна только при соблюдении определенных условий. Применительно к процессу резки металла на ножницах для получения

адекватных результатов моделирования также существует ряд требований, которые должны учитывать особенности реализации и протекания процесса [2].

Детальный анализ теоретических исследований и экспериментальных данных процесса горячей резки на ножницах [3, 4] позволяет указать еще один фактор требующий учета в ходе математического моделирования. Так, полученные в работе [4] теоретические зависимости силы резания имеют существенные различия на первоначальном этапе процесса, когда в ходе моделирования процесса имеет место резкое (практически мгновенное) возрастание силы резания, что не соответствует результатам экспериментов, где наблюдается плавный рост силы с течением времени.

В классическом представлении процесса резки на ножницах [5, 6] выделяют три стадии: вмятие ножей в металл, сдвиг (собственно рез), скол. При этом, как раз на этапе вмятия и наблюдается плавное увеличение силы резания.

Таким образом, опираясь на результаты работы [4], можно предположить, что процесс вмятия сопровождается упругой деформацией станины ножниц, а ее учет в ходе математического моделирования позволит приблизить результаты теоретических решений к экспериментальным и расширить представление о ходе процесса резки.

Целью данной работы является оценка влияния упругой деформации станины ножниц в процессе горячей резки на результаты математического моделирования МКЭ для обеспечения максимального соответствия результатов моделирования и экспериментальных данных.

Для достижения указанной цели использовали конечно-элементную математическую модель (на базе программного комплекса ABAQUS), описывающую плоскую задачу резки параллельными ножами и учитывающую жесткость станины. Результаты моделирования сравнивали с результатами ранее проводившихся лабораторных исследований по определению влияния технологических параметров процесса резки металла на ножницах с параллельным резом на величину удельной работы [3].

Модель (рис. 1) состоит из трех абсолютно жестких недеформируемых тел – прижим, верхний и нижний ножи, а также деформируемого бруса, моделирующего лист и отрезаемую кромку. С целью учета упругой деформации станины в модель введен упругий элемент, а для исключения значительных динамических колебаний – вязкий демпфер.

При этом, по аналогии с реальной конструкцией лабораторных ножниц с нижним резом движение сообщается одновременно нижнему ножу и прижиму, тогда как верхний нож может смещаться, только преодолевая жесткость (упругую деформацию) станины.

Деформируемый брус представляет собой сетку из изопараметрических четырехугольных линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования, имеющих свойства сплошной деформируемой среды в условиях плоской деформации.

Для описания пластического течения материала заготовки использовали соотношение Восе [4], поскольку авторами было установлено, что применительно к моделированию МКЭ процесса горячей резки на ножницах эта модель является

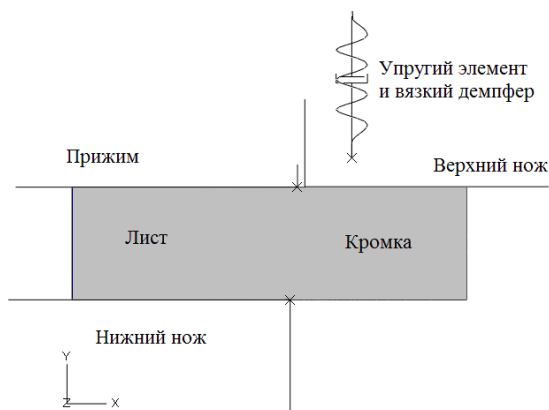


Рис. 1. Общий вид модели резки параллельными ножами с учетом упругой деформации станины

наиболее эффективным видом функции аппроксимирующей поведение материала в процессе деформирования.

Учитывая, что процесс резки сопровождается большими пластическими деформациями, в ходе математического моделирования использовали процедуру адаптации сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера [7]. Инструменты моделировали как аналитические недеформируемые поверхности. Трение между контактными поверхностями моделирует закон трения

Кулона. При этом коэффициент трения является величиной постоянной, характеризующей связь между контактным давлением и эквивалентным касательным (контактным) напряжением.

На левую боковую поверхность бруса накладывали ограничение по его перемещению вдоль оси X.

Разрушение материала моделировали методом исключения элементов из расчета, после исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности [7].

Исходными данными для расчета были приняты следующие: толщина разрезаемого листа – 10 мм, ширина отрезаемой кромки – 15 мм, номинальная температура процесса – 650°C, скорость резки – 28 мм/с.

Учитывая, что на базе данной модели решается плоская задача, то жесткость станины ножниц участвующую в расчетах определяли как величину приведенную к единице ширины разрезаемой заготовки.

Как показал ход моделирования на этапе вмятия наблюдается рост силы резания, однако внедрение ножей в металл увеличивается незначительно, поскольку происходит упругая деформация станины (рис. 2).

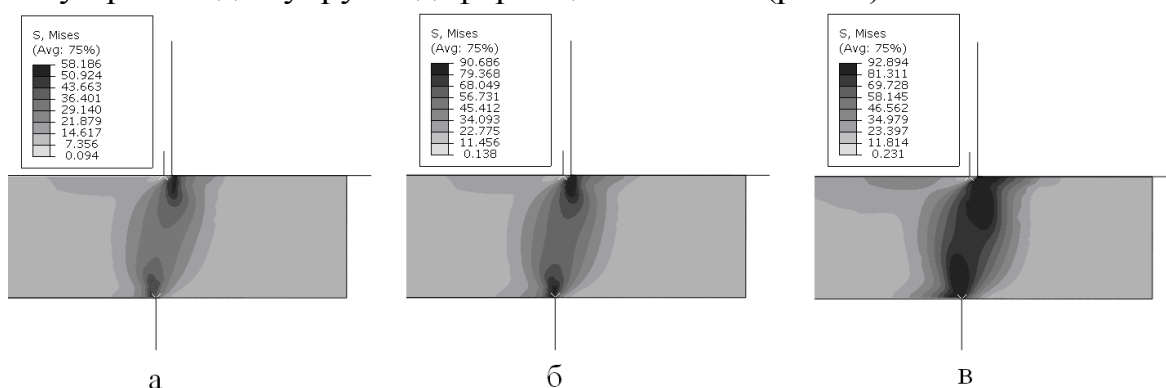


Рис. 2. Эпюры распределения напряжений по Мизесу на различных этапах вмятия: а – 0,02 с; б – 0,04 с; в – 0,06 с

По результатам моделирования были получены зависимости изменения во времени силы резания, приходящейся на 1 мм ширины и величины внедрения ножей в металл.

Для сравнения экспериментальных и теоретических данных на рис. 3 представлены зависимости изменения во времени силы резания, а на рис. 4 величины внедрения ножей в металл.

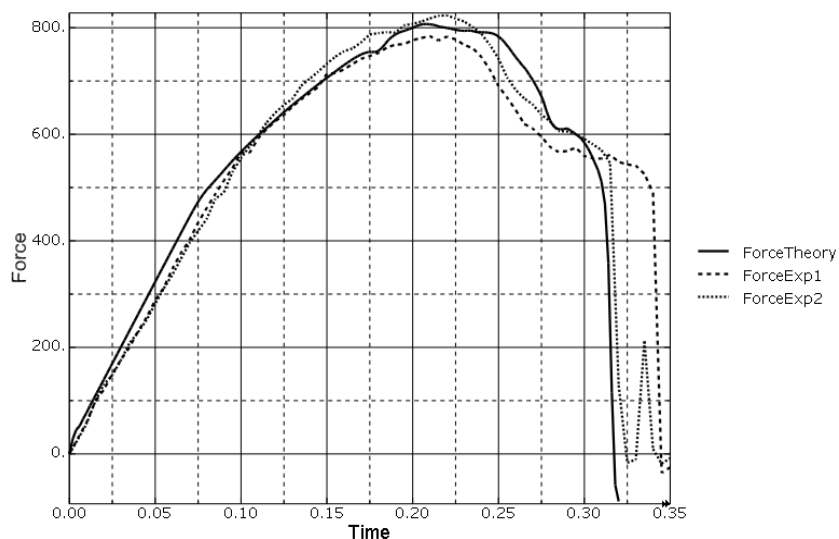


Рис. 3. Зависимости изменения во времени силы резания, приходящейся на 1 мм ширины по результатам экспериментов (ForceExp1 и ForceExp2) и моделирования (ForceTheory)

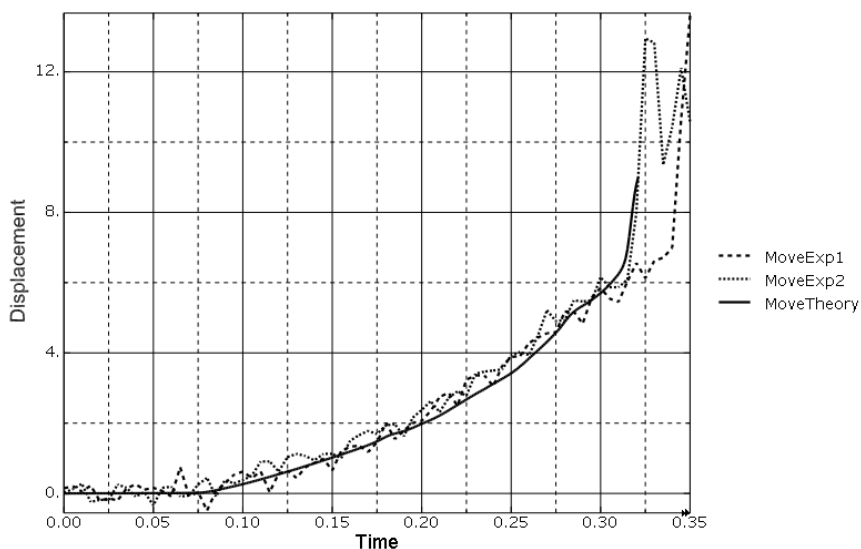


Рис. 4. Зависимости изменения во времени величины внедрения ножей в металл по результатам экспериментов (MoveExp1 и MoveExp2) и моделирования (MoveTheory)

Как можно видеть из представленных зависимостей результаты моделирования в целом хорошо согласуются с экспериментальными данными. Однако, на этапе собственно реза можно наблюдать некоторое отличие по силе резания (см. рис. 3), что можно объяснить недостаточно исследованным механизмом разупрочнения и разрушения материала для данной марки стали (A36) при данной температуре. При этом следует указать, что в качестве диаграммы пластичности, согласно которой моделируется процесс разрушения, была взята диаграмма для стали близкой по химическому составу стали 09Г2С, поскольку найти такие данные для марки A36 при температуре резки не представляется возможным.

Еще одним немаловажным фактором при оценке адекватности полученных решений является формообразование свободных поверхностей. Так на рис. 5 для сравнения представлены формы профиля заготовки по результатам моделирования и после резки параллельными ножами. При этом можно утверждать, что имеет место очень хорошая сходимость между теоретическим решением и экспериментом.

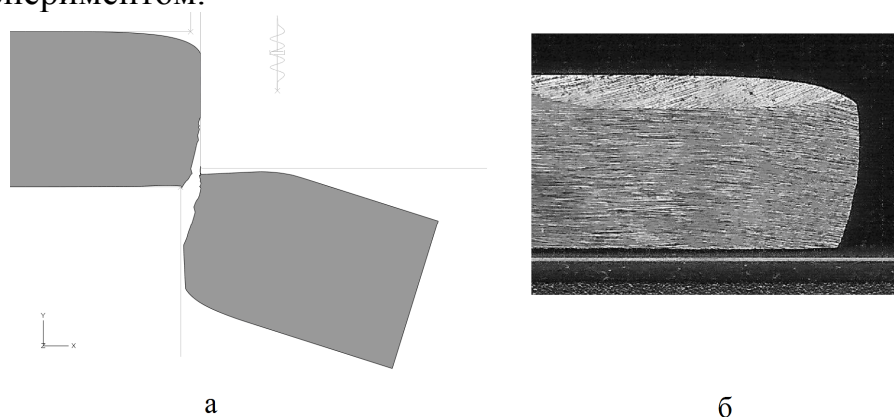


Рис. 5. Форма профиля заготовки по результатам моделирования (а) и после резки параллельными ножами (б)

Таким образом, полученные результаты указывают на необходимость учета упругой деформации станины с целью получения более адекватных теоретических решений.

**Выводы:** учет упругой деформации станины ножниц в ходе математического моделирования позволяет приблизить результаты теоретических решений к экспериментальным и расширить представление о ходе процесса резки; стадия вмятия ножей в металл сопровождается упругой деформацией станины ножниц, что оказывает влияние на характер нарастания силы резания; на этапе вмятия наблюдается рост силы резания, однако внедрение ножей в металл увеличивается незначительно; необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования с целью уточнения механических и пластических свойств металлов в горячем состоянии.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях процесса горячей резки металла на ножницах.

**Список литературы:** 1. Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348с. 2. Боровик П. В. Развитие методов численного моделирования процессов резки металла на дисковых ножницах / П. В. Боровик. / Сборник научных трудов / ДГМИ. – Алчевск, 2006. – Вып. 22. – С. 166-172. 3. Боровик П. В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах : дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук, спец. 05.03.05 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с. 4. Боровик П. В. Выбор аппроксимации механических свойств при математическом моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Металлургические процессы и оборудование – Донецк, – 2011, – 2(24) – С. 5-9. 5. Целиков А. И. Прокатные станы : учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М. : Металлургиздат, 1958. – 432 с. 6. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. – М. : Металлургия, 1985. – 375 с. 7. Wisselink H. H. Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D-Thesis / H. H. Wisselink. – Twente, The Netherlands, 2000.